

Vliv tvaru nehomogenity v izolačním systému olej-papír na velikost částecných výbojů

P. Trnka¹, M. Širůček¹, B. Paslavský²

¹ Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

² Katedra elektroenergetiky a ekologie, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : pavel@ket.zcu.cz, msirucek@ket.zcu.cz, paslaboh@kee.zcu.cz

Anotace:

Měření částečných výbojů je jednou z důležitých diagnostických metod vysokonapěťových strojů. U izolačního systému transformátorů velkých výkonů a velkých napětí reprezentovaného pevnou a kapalnou částí se využívá k detekci různých nehomogenit, poruch a defektů. Ty jsou způsobovány nedokonalostí výrobních technologických procesů spolu s tepelným, elektrickým i mechanickým namáháním během provozu zařízení. Částečné výboje se měří zejména ve vinutí, závitech a průchodkách. Výbojová činnost byla zkoumána na vzorcích transformátorového vinutí s různým nedokrytím v izolačním systému olej-papír. Jako vzorek byla použita krátká měděná tyč s laboratorně vytvořeným izolačním systémem obsahujícím danou sledovanou nehomogenitu. V rámci experimentu byly aplikovány dva druhy izolačních kapalin, běžně používaný minerální olej a k životnímu prostředí šetrný olej FR3.

Partial discharges measurement is an important method for diagnostics of high voltage machines. The insulating system of power transformers is created by the solid and the liquid part. In these parts is the method used for detection of non-homogenous areas, failures and defects. They are usually created by technology process faultinesses or thermal, electrical and mechanical stress during a transformer running condition. Partial discharge activities are measured especially in windings, coils and bushings. Partial discharges in different types of non homogenous areas of paper-oil insulating system were observed. Two insulating liquids were used in the experiment. The first was mineral oil and the second was environmental friendly liquid FR3.

ÚVOD

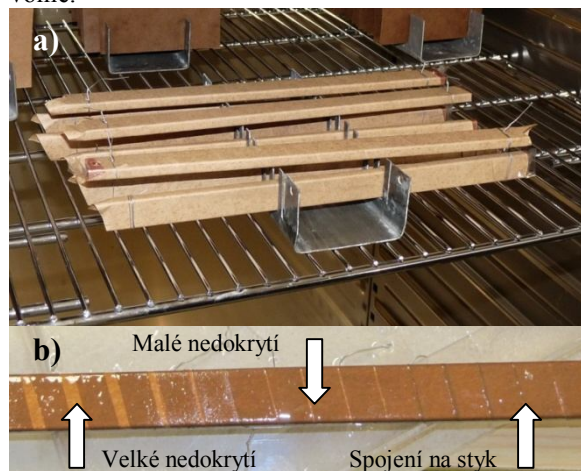
Částečné výboje jsou významným faktorem, který se podílí na snižování životnosti izolačního systému vysokonapěťových zařízení a tím i spolehlivosti daného transformátoru. Ke vzniku výbojové činnosti dochází v oblastech různých strukturálních nehomogenit, způsobovaných buď nedokonalostí výrobních technologických procesů, nebo vlivem dlouhodobého provozního namáhání. V důsledku působení vysokého napětí na tyto oblasti nejčastěji vyplněné plynem dochází k ionizaci prostředí, která vyústí v mikropřeraz uvnitř izolačního systému. Množství energie, které se při procesu uvolňuje, může být dostatečné pro rozštěpení uhlíkových řetězců jednotlivých složek izolačního systému. Z tohoto důvodu patří měření částečných výbojů k jedné z důležitých predikčních metod při diagnostice transformátorů. Proto bylo studium částečných výbojů orientováno na nehomogenity v izolačním systému olej - papír. Na základě jednotlivých výbojových projevů je možné odhadnout rozměry a druh jednotlivých nehomogenit a určit tak přesněji příčinu poruchy. Podobná problematika už byla na pracovišti autorů řešena. Měření částečných výbojů probíhalo v různých prostředích a pro různé uspořádání elektrod [2],[3]. Provedený experiment je počátkem nové řady experimentů zaměřené na

studium částečných výbojů v izolačním systému olej-papír.

EXPERIMENT

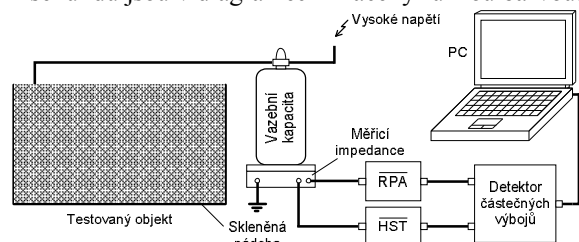
Cílem experimentu bylo studium změn výbojové činnosti v oblastech s odlišnou velikostí překrytí izolačního materiálu. Oblasti znamenají nehomogenitu, která může vlivem nerovnoměrného rozložení elektrického potenciálu způsobovat vznik částečných výbojů. Autory rovněž zajímalo, zda může být velká výbojová aktivita způsobena menší nehomogenitou a naopak velká nehomogenita způsobuje pouze malou výbojovou činnost. Testovaný vzorek byl měděný vodič o rozměrech 1,6 mm x 0,6 mm x 25 mm ovitý dvěma vrstvami pásky z krepovaného kraft papíru **22 HCC Dennison** (0,08 mm x 2,5 mm). Vzorky byly vysušeny na základě předchozích zkušeností autorů po dobu 48 h při teplotě 55 °C, aby se odstranila z papíru nežádoucí vlhkost, která by významně ovlivňovala elektrické vlastnosti. Samotný vzorek byl po dobu 336 hodin ponechán v oleji, aby jím byl vhodně prosycen. Pro oba druhy oleje byly vyrobeny čtyři vzorky, celkem tedy bylo testováno osm vzorků. Na každý vzorek byly umístěny tři měřicí elektrody. Při navíjení vzorku byly v pravidelnosti izolace vytvořeny 3 sekce, kde každá zabírala přibližně 1/3 délky izolace. Měřicí elektrody z měděné samolepící fólie byly

umístěny na každou sekci. Naměřené údaje tak poskytují informace o nedokrytí izolace o velikostech 3-4 mm, 1-2 mm a „symetrické“ oblasti izolace realizovanou spojením na styk. Měřicí elektroda, na které probíhalo měření, byla uzemněna, ostatní elektrody byly při příslušném měření ponechány volně.



Obr. 1: a) Měděné trny ovinuté kraft papírem při sušení v peci, b) Jednotlivé sekce umístěné na vzorcích.

Pro každou elektrodu bylo proměřeno 15 hodnot zápalného napětí U_i (napětí kdy je zaznamenána stabilní výbojová činnost, ta byla určena jako pravidelně se opakujícími pulsy o velikosti náboje alespoň 5 pC) a velikost zdánlivého náboje Q_{iec} po 1. a 10. minutě. Měření bylo provedeno i pro vyšší napětí, které odpovídalo cca 1,25 násobku U_i . Výbojová činnost, je měřena v závislosti na fázi testovacího napětí. Četnosti výskytu výbojů za 1 sekundu jsou v diagramech značeny různou barvou.



Obr. 2: Schéma zapojení

Provedená měření proběhla ve dvou různých olejích:

1. Shell Diala DX – běžně používaný minerální olej získaný destilací z ropy. Jeho struktura je tvořena zejména směsí uhlovodíkových molekul.

2. Envirotemp FR3 – olej na bázi přírodních esterů vyráběný ze surových semen a biologicky odbouratelných přísad. Začal se využívat pro lepší vlastnosti - především vysoký bod vzplanutí a obecně větší životnost díky stabilitě vlastností a lepšímu vztah k životnímu prostředí daný snazší odbouratelností [4]. Na základě předchozích měření elektrických a neelektrických parametrů [5] se FR3 ukazuje jako perspektivní biologicky odbouratelná

náhrada vhodná pro praktickou transformátorovou aplikaci [6]. Měření vybraných parametrů testovaných olejů provedené v rámci výše uvedeného experimentu bylo realizováno v olejové laboratoři ČEZ panem Ing. Jaroslavem Kubalíkem, Ph.D.

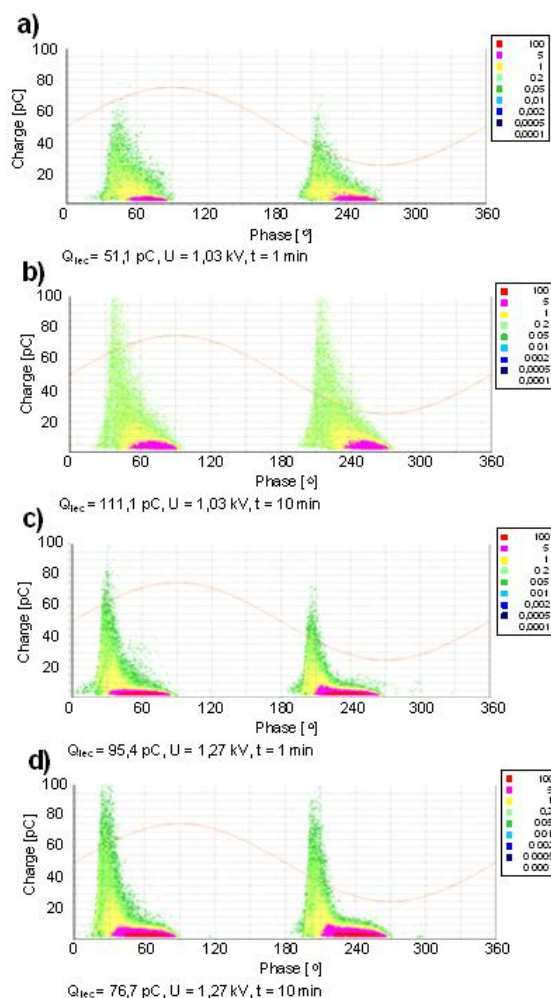
Tab. 1: Parametry testovaných olejů. [6]

Parametr	Diala DX	FR3
E_p [kV/2,5mm]	48,8	74,2
Viskozita [mm ² /s]	8,68	33,9
ČK [mgKOH/g]	0,008	0,053
tgδ [-]	0,056	1,76 (0,05*)
ρ_v [$\Omega \cdot m \cdot 10^{10}$]	279,6	0,813 (30,0*)

* katalogový údaj [5]

VYHODNOCENÍ

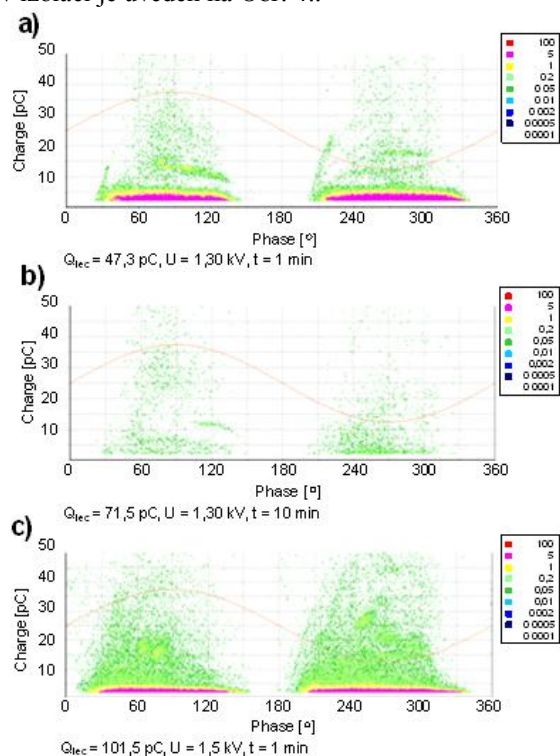
První měření bylo provedeno na vzorcích ponořených v oleji Diala DX. Výsledky jsou prezentovány na průbězích ČV v jednotlivých sekcích tyče 1.



Obr. 3: Průběhy částečných výbojů u vzorku 1 v oleji Diala v případě oblasti izolace spojené na styk.

Na Obr. 3: jsou uvedeny průběhy částečných výbojů změřených po 1. a 10. minutě, při zápalném napětí na elektrodě umístěné nad symetrickou oblastí izolace.

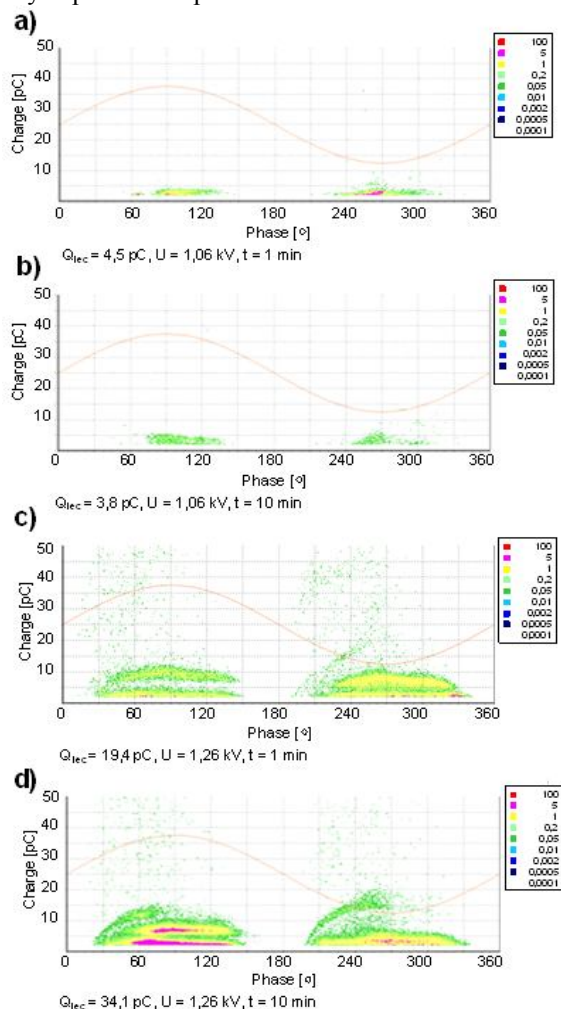
U všech průběhů i při zvýšeném napětí je vidět významný nárůst četnosti výbojů s náběhem sinusového průběhu testovacího signálu. Možné vysvětlení je, že i přes „symetrické“ uspořádání izolace existuje ve struktuře materiálu velké množství mikroskopických vzduchových bublinek. Přivedením zápalného napětí dochází k ionizaci prostředí v těchto dutinkách, které se kvůli malým rozměrům rychle zapálí a vznikají tak oblasti s velkou četností výbojů. Po zapálení dutinky se nosiče náboje vzniklé ionizací přemísťují na protilehlou stranu dutinky, kde vytváří elektrické pole působící proti vnějšímu elektrickému poli. Dochází tak ke snižování velikosti intenzity elektrického pole v jednotlivých dutinkách, které se projevují poklesem četnosti výbojové činnosti. Po 10 minutách byla pro obě hodnoty napětí změřena větší hodnota Q_{iec} oproti počátku. Vyšší testovací napětí způsobilo zvýšení hodnoty Q_{iec} přibližně o polovinu. Příklad průběhů na elektrodě s malým nedokrytím v izolaci je uveden na Obr. 4:.



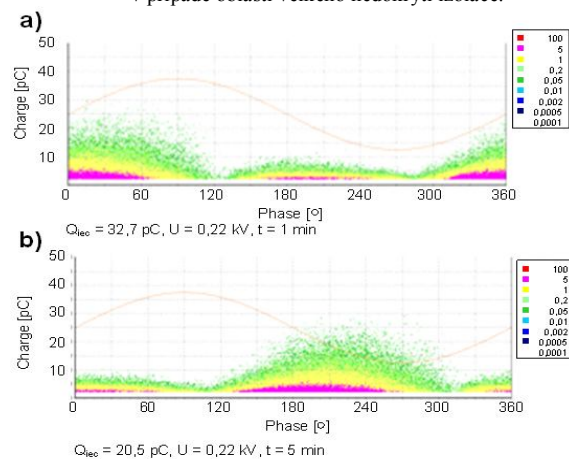
Obr. 4: Průběhy částečných výbojů u vzorku v oleji Diala v případě oblasti malého nedokrytí izolace.

V tomto případě bylo zápalné napětí U_i přivedené na elektrody větší, než u izolace spojené na styk. Po 10 minutách byl pozorován významný samozhášecí jev, který způsobil pokles četnosti výbojů v oblastech vrcholů půlvlny testovacího napětí. Zvýšením testovacího napětí došlo ke zvýšení četnosti výbojů, která kopírovala sinusový tvar přiváděného napětí. S délkou jeho působení přibližně po 5 minutách Q_{iec} prudce vzrostl, až na hodnotu 1 nC. I v tomto případě došlo se zvýšením napětí ke zdvojnásobení hodnoty Q_{iec} . Poslední typ testovaného uspořádání izolačního materiálu vykazoval malé hodnoty zdánlivého náboje

a velikost zápalného napětí srovnatelnou s oblastmi s malým nedokrytím. Po 10 minutách došlo při testovacím napětím rovném zápalnému k poklesu četnosti výbojů, a zdánlivého náboje Q_{iec} . V případě většího napětí již nastal významný nárůst výbojové činnosti dosahující až 5 násobku hodnot Q_{iec} změřené při zápalném napětí. Po 10 minutách se rozdíl ještě zvýšil přibližně o polovinu.



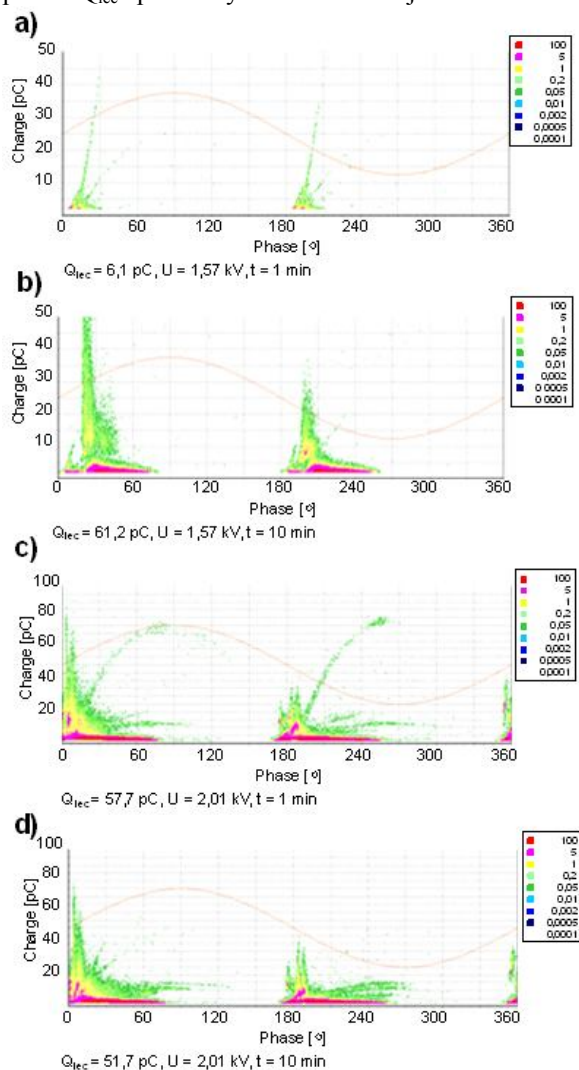
Obr. 5: Průběhy částečných výbojů u vzorku v oleji Diala v případě oblasti velkého nedokrytí izolace.



Obr. 6: Výbojová činnost na vzorku s malou hodnotou U_i .

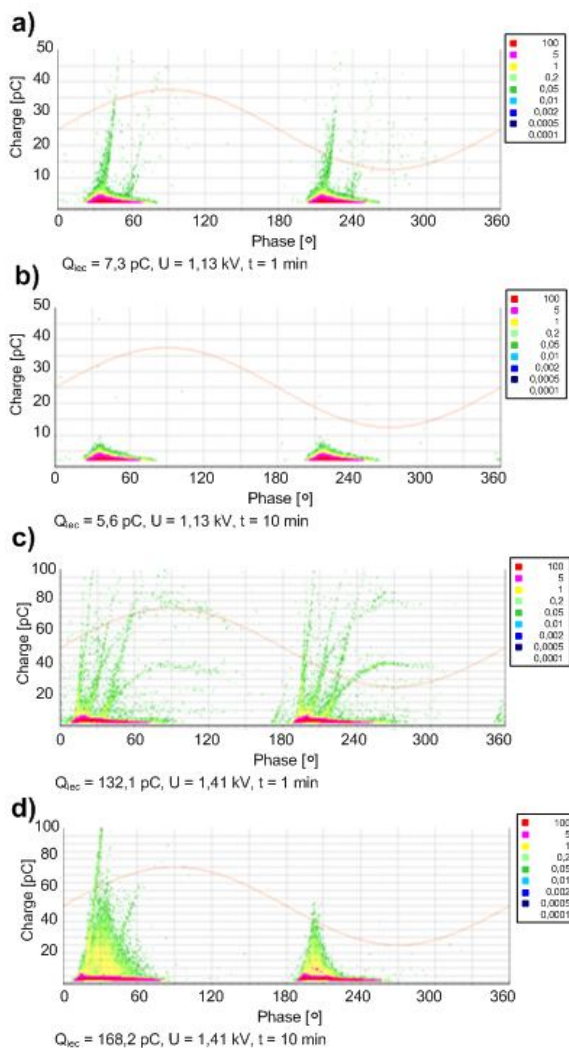
U vzorku 4 byly zjištěny extrémně nízké hodnoty zápalného napětí někdy až 0,2 kV a velká četnost Q_{iec} . Zápal u oblasti velkého nedokrytí izolace vzorku nastal téměř okamžitě po přivedení napětí. Obr. 6: znázorňuje neobvyklé rozložení tvaru vnitřních částečných výbojů v této oblasti. Výboje by měly být správně koncentrovány v oblasti vrcholu půlvlny testovacího signálu. V průběhu měření ovšem docházelo k jejich pravidelnému rychlému posouvání vůči fázi testovacího napětí (Obr. 6).

Stejným způsobem došlo k proměření jednotlivých oblastí izolace i u vzorků tyčí ponořených v oleji FR3. Prezentované průběhy, byly změřeny na vzorku 4. U oblasti izolace spojené na styk, byla pro poměrně vysoké hodnoty zápalného napětí (1,57 kV) změřena velmi malá hodnota náboje Q_{iec} , která se po 10 minutách měření desetinasobně zvýšila. Při vyšším testovacím napětí se ukázala podobnost se vzorky v oleji Diala DX (Obr. 7:) kde nastala nejvyšší četnost výbojů v oblastech počátku sinusového signálu. Po 10 minutách byl pozorován částečný pokles Q_{iec} způsobený samozhášecím jevem.



Obr. 7: Průběhy částečných výbojů u vzorku v oleji FR3 v případě oblasti izolace spojené na styk.

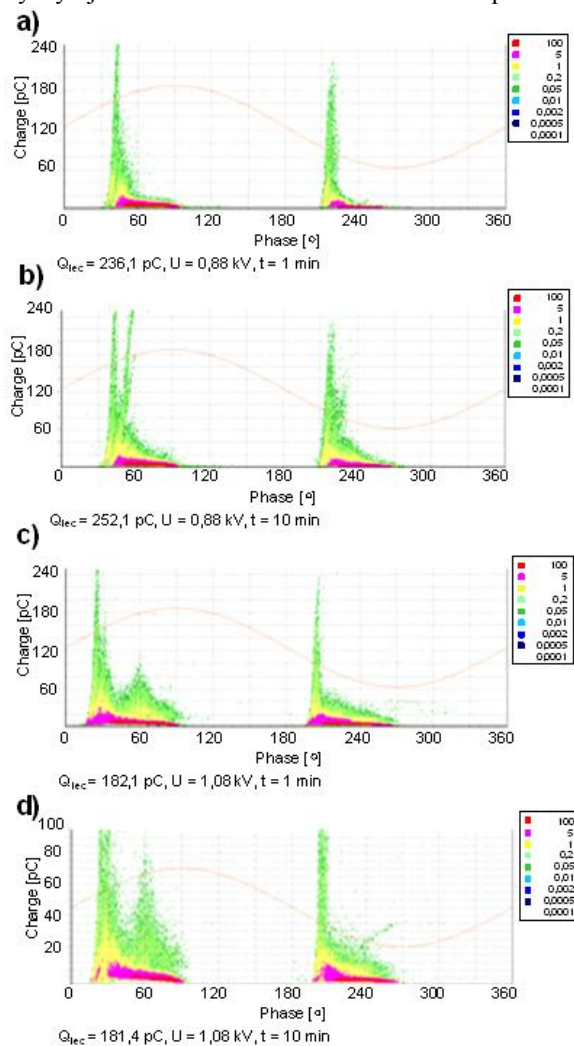
V případě malého nedokrytí v izolaci bylo zápalné napětí menší, než v případě izolace spojené na styk. Velikost Q_{iec} byla malá a srovnatelná s hodnotou u „symetrické“ izolace. Po 10 minutách nastal samozhášecí jev, což způsobilo pokles Q_{iec} . Zvýšením testovacího napětí se četnost výbojů oproti zápalnému napětí mnohonásobně zvýšila a začala se projevovat, již v počátku fáze přiváděného napětí. Po 10 minutách nedošlo k pozorování samozhášecího jevu, naopak hodnota Q_{iec} se zvýšila a to přibližně o 40 pC.



Obr. 8: Průběhy částečných výbojů u vzorku v oleji FR3 v případě oblasti malého nedokrytí izolace.

V oblastech izolace s největším nedokrytím (Obr. 9:) byly změřeny nejnižší hodnoty zápalného napětí a oproti dalším částem izolace i poměrně vysoká hodnota Q_{iec} (řádově stovky pC). Ostatní části izolace dosahovaly při zápalném napětí jednotky maximálně desítky pC. Zvýšením zápalného napětí se stejně jako v případě vzorků v oleji Diala (Obr. 5:) projevovalo zvýšením hodnoty Q_{iec} . Po 10 minutách nastalo pro obě velikosti přiváděného napětí u vzorků s touto nehomogenitou v obou olejích rozhoření výbojů, které se projevilo zvyšováním jejich četnosti.

Na základě obecného porovnání vzorků v oleji Diala a FR3 vychází, že u FR3 jsou zjištěny menší hodnoty Q_{iec} při zápalném napětí. Dojde-li ke zvýšení přiváděného napětí, četnost výbojů v FR3 se významně zvyšuje. Výbojová činnost ve vzorcích v oleji FR3 je tedy oproti oleji Diala poměrně nestabilní. V případě FR3 se více projevuje píkový tvar průběhů, kdy se největší četnost výbojů vyskytuje v určité oblasti fáze testovacího napětí.



Obr. 9: Průběhy částečných výbojů u vzorku v oleji FR3 v případě oblasti velkého nedokrytí izolace.

STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Při každém měření se musí brát v úvahu, že se snažíme zjistit pravou (skutečnou) hodnotu měřené veličiny. Každé z množiny provedených měření není samo o sobě pravou hodnotou, ale z této množiny měření lze určit průměrnou hodnotu s určitým intervalem závislým na přesnosti, jaká je pro dané vyhodnocení požadována. Velikost intervalu vychází z výsledků daných měření, z počtu měření a rozptylu naměřených hodnot, v metrologické praxi, bývá tento interval, který rozšiřuje průměrnou hodnotu, nazýván

nejistotou typu A. Nejistoty typu B jsou pevného charakteru a jsou stejné pro všechna měření. Obsahují v sobě chybu měřicí aparatury, chybu metody a chybu obsluhy. Pevná složka nejistoty měření nebyla předmětem experimentu, proto není již dále uvažována.

Nejistoty typu A vycházejí zjištěného průměru naměřených hodnot a vypočtené směrodatné odchylky, ale tento výpočet má význam pouze pro případy, kde je počet měření $n > 10$. Částečné výboje jsou náhodnou veličinou a jejich měření je závislé na několika na sobě nezávislých faktorech. Pro další vyhodnocování je nutné zvolit rozdělení, podle něhož se bude poté dále postupovat. V tomto případě pro měření náhodné veličiny se nabízí normální rozdělení (též označováno jako Gaussovo rozdělení), které vychází z aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Aritmetický průměr \bar{x} tvoří podíl součtu všech naměřených hodnot a počet těchto měření (hodnot):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Následná směrodatná odchylka σ souboru dat o počtu n se spočte jako druhá odmocnina z podílu, kde čitatel je tvořen součtem druhých mocnin rozdílů naměřených hodnot a aritmetického průměru podělený počtem provedených měření:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

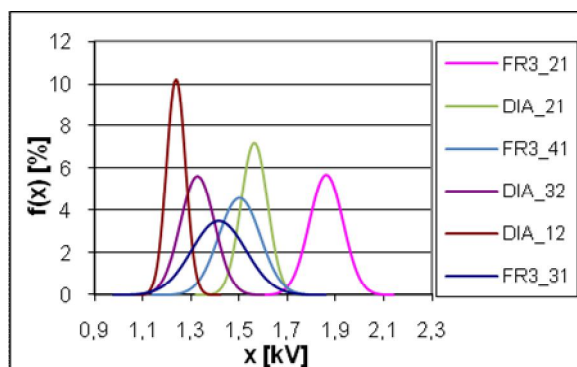
Normální rozdělení $N(\bar{x}, \sigma)$ se počítá na základě dvou parametrů (výše uvedených) jako pravděpodobnostní funkce:

$$N(\bar{x}, \sigma) = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

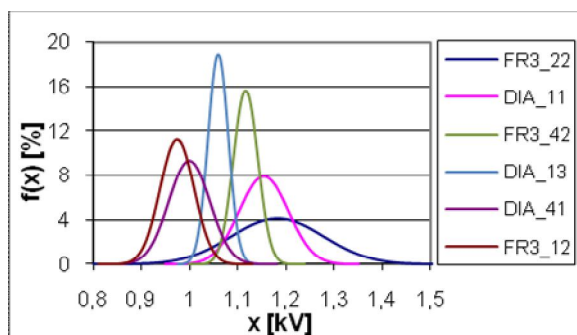
V případě měření zapalovacího napětí částečných výbojů U_i bylo pro jednu měřicí elektrodu provedeno 15 měření, ze kterých byly odstraněny dvě odlehle hodnoty aplikováním metody modifikované vnitřní hradby [1]. Vypočtené hodnoty nebyly ovlivněny jednou či dvěma vzdálenými naměřenými hodnotami, které mohou vzniknout například příliš rychlou regulací přiloženého napětí, nebo nedostatečným zotavením izolačního systému v průběhu měření po sobě jdoucích dvou hodnot. V dalším statistickém vyhodnocení je počítáno s 13 hodnotami pro každou elektrodu. Přesto je splněna podmínka, že je počet hodnot větší než 10, které jsou pro

výpovědi schopnost statistického vyhodnocení zápalných napětí na základě zkušeností autorů „nutností“. Při použití tří elektrod na vzorku tyče a čtyř tyčí pro dva oleje, vzniká rozsáhlý soubor dat pro statistickou analýzu. Vyhodnocovány jsou zapalovací napětí, protože dřívější měření provedená na našem pracovišti ukázala určitou korelaci mezi napětím zapalovacím a zhášecím. Korelace těchto dvou proměnných ukazuje na přímou závislost, což v našem případě znamená, že při zvýšení zapalovacího napětí se zvýší i zhášecí.

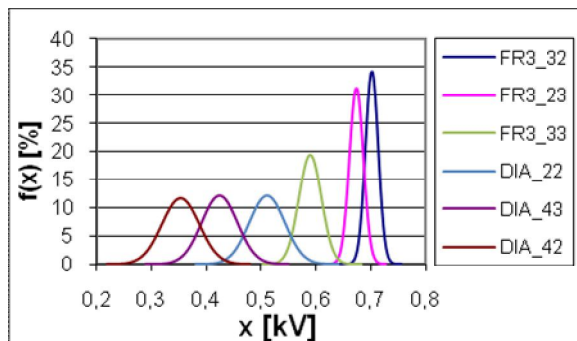
Na Obr. 10 ÷ 12 jsou uvedeny Gaussovy křivky pro jednotlivé vzorky, rozdělených podle velikosti zápalného napětí do tří skupin. První písmeno označuje číslo tyče (1 ÷ 4) a druhé číslo znázorňuje sekci izolace, kde bylo U_i změřeno (1 – spojení na styk, 2 – malé nedokrytí, 3 – velké nedokrytí).



Obr. 10: Normální rozdělení pro tři vzorky s nejvyšším U_i .



Obr. 11: Normální rozdělení pro tři vzorky s průměrným U_i .



Obr. 12: Normální rozdělení pro tři vzorky s nejnižším U_i .

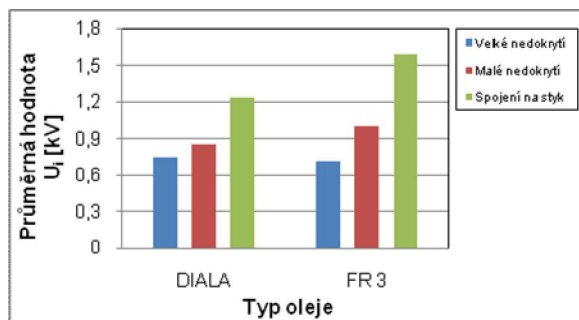
Při statistickém vyhodnocování je zcela patrné, jak je velikost zapalovacího napětí ovlivněna „kvalitou“ navinutí. Dle velikosti mezer při navinutí můžeme

rozdělit oblasti izolace na tři typy – spojení na styk („symetrické“), s malým nedokrytím a s velkým nedokrytím, toto rozdělení se objevuje i při statistickém vyhodnocení, kdy vznikají zhruba tři skupiny vzorků. První skupina s nejnižším zapalovacím napětím (v rozmezí 0,4 kV až 0,7 kV), druhá skupina vzorků má zapalovací napětí okolo 1 kV, pro vzorky nejlépe navinuté se zapalovací napětí pohybuje nad hodnotou napětí 1,3 kV. Pro všechny vzorky byla počítána směrodatná odchylka, která měla, pro vzorky se zapalovacím napětím do 1 kV, tendenci pohybovat se pod hranici 0,04 kV – až na výjimky, což se projevilo i na velké strmosti grafů a velkých hodnot normálního rozdělení (20 a více). Pro vzorky se zapalovacím napětím nad 1 kV má směrodatná odchylka tendenci narůstat a to v lineární závislosti na zapalovacím napětí a to až k hodnotám 0,1 kV pro nejvyšší zapalovací napětí, tyto hodnoty se projeví snížením strmosti grafu funkce normálního rozdělení a jeho rozšířením. Z grafu pro nejvyšší hodnoty zapalovacích napětí je toto jasně patrné, kdy pro nižší hodnoty zapalovacího napětí narůstá křivka Gaussova rozdělení. Při porovnání olejů v tomto „fenoménu“ si hůře vede olej FR3, u kterého se nárůst směrodatné odchylky projevuje více až k hodnotám 0,1 kV. To může být způsobeno pomalejším zotavením mezi jednotlivými měřeními než v oleji DIALA. Ten má nižší zapalovací napětí než olej FR3 a to pro dobře navinutou izolaci okolo hodnoty 1,3 kV, ale s menší směrodatnou odchylkou. Proto se o tomto oleji dá říci, že je „stabilnější“ ve výbojové činnosti, která vynikala vyšším zapalovacím napětím s užší oblastí kolem střední hodnoty. Pro hodnoty nižšího zapalovacího napětí při nedokrytí izolace (ať malém či velkém) se oba oleje chovají obdobně, většina směrodatných odchylek se pohybuje pod výše zmíněnou hodnotou 0,04 kV. Pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty v okolí určeném směrodatnou odchylkou od střední hodnoty je 60 %. Pro zvýšení jistoty, že se pravá hodnota měření pohybuje, ve spočteném intervalu dochází k rozšíření na 95,4 % pro dvojnásobek směrodatné odchylky, trojnásobek znamená přesnost, s jakou jsme dosáhli měření je rovna 99,6 %.

ZÁVĚR

Měření částečných výbojů bylo provedeno celkem na 8 vzorcích, kde každý byl opatřen 3 měrnými elektrodami. Na každé z těchto elektrod bylo provedeno 15 měření, ze kterých se na základě velikosti zápalného napětí (U_i) odstranily 2 odlehle hodnoty. Celkem tak bylo získáno a statisticky zpracováno 312 hodnot U_i . Na základě provedených měření vzorků v obou olejích lze usuzovat následující závěry. Druh nedokrytí ovlivňoval především velikost zápalného napětí. U izolace spojené na styk („symetrické“), byly zjištěny jedny z nejvyšších hodnot zápalného napětí měřené tyče. Naopak u oblastí s velkým nedokrytím, byly hodnoty U_i vždy

významně nižší zejména v případě tyče 2 a 4 v oleji Diala kde byl tento rozdíl oproti „symetrické“ oblasti více než poloviční. Velikost výbojové činnosti konkrétní oblasti je dána podle získaných údajů především geometrií mikrodutin uvnitř izolace. Ty mají rozhodující vliv na velikost, četnost výbojů a tím i na tvar jednotlivých výbojových obrazců. Z tohoto důvodu je nezbytným faktorem vhodné dodržení výrobních postupů zejména při sušení izolace a při navíjení vzorků. Předpoklady kdy velká nehomogenita může vytvářet malou výbojovou činnost, se potvrdily (Obr. 5:). V případě velkého nedokrytí izolace jsou ovšem výsledné hodnoty náboje významně závislé na přiváděném napětí a mohou vytvářet mnohonásobně vyšší hodnoty. Tyto útvary jsou tedy poměrně nestabilní. Naopak oblasti s malými nehomogenitami nebo symetrickou izolací mohou dosahovat vyšších hodnot zdánlivého náboje (Q_{tec}), ale se změnou hodnot napětí se mění pouze minimálně. Velikost výbojové činnosti je se změnou napětí tedy poměrně stabilní. Při zápalném napětí je u jednotlivých obrazců četnosti částečných výbojů vidět rozdíl tvarů pro testované druhy nedokrytí. Na základě získaných výsledků lze říci, že mezi velikostí nehomogenity a velikostí zápalného napětí platí nepřímá úměra. Čím větší je nehomogenita, tím menší je velikost zápalného napětí (Obr. 13:).



Obr. 13: Průměrná velikost U_i všech vzorků v příslušném oleji a pro danou nehomogenitu (nedokrytí) v izolaci.

Náběh výbojové četnosti je nejstrmější u symetrické elektrody. Experiment ukázal, že velikost nedokrytí ovlivňuje v některých případech posuv četnosti částečných výbojů. Čím je oblast nedokrytí větší, tím se poloha pík výbojové četnosti přesouvá do oblasti středu sinusového testovacího signálu (Obr. 3,4,7,8).

PODĚKOVÁNÍ

Následující příspěvek byl vypracován za pomoci prostředků z Nadace ČEZ a interního studentského grantového systému SGS 2010 - 037. Autoři by jim tímto rádi poděkovali za podporu.

LITERATURA

- [1] Meloun, M., Militký, J. Kompendium statistického zpracování dat, Academia Praha, 2002, 766 s. ISBN 80-200-1396-2.
- [2] Mentlík, V., Pihera, J., Širůček, M. et al. "Partial discharges of solid insulation in different insulating fluids." in IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2010). Germany (Postdam), 2010, pp. 1-4, ISBN: 978-1-4244-7945-0
- [3] Mentlík, V., Pihera, J., Paslavský, B. et al. "Corona discharge in different insulating fluids" in Annals of DAAAM for 2010, Croatia (Zadar)
- [4] Stockton, D. P., Bland, Jr. J. R., Mcclanahan, T., Wilson, J., Harris, D. L.; Mcshane, P. "Natural ester Transformer fluids: Safety, reliability and environmental performance." in IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC 2007), Canada (Calgary), pp. 1-7. ISBN: 978-1-4244-1140-5
- [5] Katalogový list oleje Cooper Envirotemp FR 3 [online], [cit. 2010-01-20], přístupný z WWW: <<http://www.nttworldwide.com/docs/fr3brochure.pdf>>
- [6] Mentlík, V., Trnka, P., Širůček, M. et al. "Teplné stárnutí izolačního systému Transformátorů" in DESAM 2010. Slovakia (Mala Lucivna): University of Žilina, 2010, pp. 79-82, ISBN: 978-80-89478-01-9
- [7] Cavallini, A., Montanari, G.C., Ciani, F., "Analysis of partial discharge phenomena in paper-oil insulation systems as a basis for risk assessment evaluation." in IEEE Dielectric Liquids (ICDL) 2005, Portugal (Coimbra), 2005, pp. 241- 244
- [8] Chen, X.; Cavallini, A.; Montanari, G.C.; , "Statistical analysis and fuzzy logic identification of partial discharge in paper-oil insulation systém." in IEEE Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) 2009, China (Schenzen), 2009, pp. 505-508
- [9] Sundara Rajan, J., "Partial discharge phenomena in paper oil insulation under conditions of copper corrosion due to sulphur in oil." in IEEE Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2009), 2009, China (Schenzen), 2009, pp.530-533
- [10] Harlow, J. H. Electric power transformer engineering. USA : CRC Press, 2007. 388 s. ISBN 0-8493-1704-5.
- [11] Winders, J. J. Power Transformers : Principles and Applications. New York : Marcel Dekker, 2002. 286 s. ISBN 0-8247-0766-4.
- [12] Heathcote, M. J., J&P Transformer book. Oxford: Elsevier, 2008. 969 s. ISBN 978-0-7506-8164-3.